

5 MWダウンウィンド風力発電システムの実証とスマート運転制御への展開

風力発電は、世界ではすでに主力電源になりつつあり、日本においても安定供給や環境適合、安全性の観点から期待が高まりつつある。さらなる発展のためには、設置環境に適合した信頼性や経済性が高い風車を提供する必要があり、特に日本近海においては、先行している欧州などと比べて環境が厳しいという課題がある。

日立はそれに応えるべく、洋上向けの5 MW風車を開発しており、高風速地域向け風車の実証試験を終え、低風速地域向け風車の実証試験に移行している。また、浮体式風車への対応も進めている。本稿では開発・実証状況を、信頼性や経済性を高めるうえで重要となる風車制御に焦点を当てて報告する。

清木 莊一郎 | Kiyoki Soichiro

坂本 潔 | Sakamoto Kiyoshi

角谷 啓 | Kakuya Hiromu

佐伯 満 | Saeki Mitsuru

1. はじめに

再生可能エネルギーは、世界においては2015年に設備容量が石炭火力発電を超え、主要なエネルギー源になりつつある¹⁾。また日本でも、経済産業省におけるエネルギーミックスの議論の中で、2014年の12.8%から2030年には22~24%にすることをめざして導入を進めることが示され、風力発電はそのうち1.7%である²⁾。日本における風力発電の課題の一つとして、日本の環境に適合した風車の開発があり、洋上、台風、地震、落雷への対応が求められている³⁾。

日立は、そのような社会的需要に応えるべく、信頼性を高めた洋上向け5 MW風車を開発している。また、遠洋に設置できることで、より安定的にかつ多くの発電が可能な浮体式洋上風車の実証試験も開始する。

本稿では、風車の仕様・特徴や開発状況を解説し、実証機での実証状況や浮体式風車の開発状況を、主に制御に焦点を当てて述べる。

2. 5 MWダウンウィンド風車

2.1

風車仕様・特徴

日立の5 MW風車の仕様 (表1参照)やコンセプト^{4), 5)}の概要は以下のとおりである。

- コスト低減策としては、主に次の3点が挙げられる。
- (1) 風車の容量を最も安価なモノパイル方式の基礎が採用可能な5 MWとした。
 - (2) 2軸軸受け外輪駆動方式を採用することでナセルを軽量化し、風車支持物の荷重を低減した。
 - (3) 平均風速が高いサイト向けのHTW5.2-127と平均風

表1 | HTW5.2-127およびHTW5.2-136基本仕様

高風速地域向けのHTW5.2-127と低風速地域向けのHTW5.2-136を開発した。

	HTW5.2-127	HTW5.2-136
ロータ直径	127 m	136 m
ブレード枚数	3	3
ロータ位置	ダウンウィンド	ダウンウィンド
ティルト角	-8 deg	-8 deg
出力制御	ピッチ・可変速	ピッチ・可変速
コーニング角	5 deg	5 deg
極値風速	55 m/s	55 m/s
年平均風速	10 m/s	7.5 m/s
乱流カテゴリ	A	A
増速比	約1 : 40	約1 : 40
発電機種別	永久磁石同期発電機	永久磁石同期発電機
PCS方式	フルコンバータ	フルコンバータ

注：略語説明
PCS (Power Conditioning System)

速が低いサイト向けのHTW5.2-136をラインアップした。

信頼性向上策としては、主に次の3点が挙げられる。

- (1) 台風襲来地を想定して設計極値風速を55 m/s (10分間平均) とし、HTW5.2-127は風速57 m/s (IEC Class T⁶) への対応も視野に入れている。
- (2) ダウンウィンド方式を採用し、暴風停電時にパッシブヨー制御にスムーズに移行することで、暴風時の荷重低減および信頼性向上を図った。
- (3) ダウンウィンド方式のメリットを生かし、ナセル前方にラジエータを配したパッシブ冷却方式を実現した。

2.2

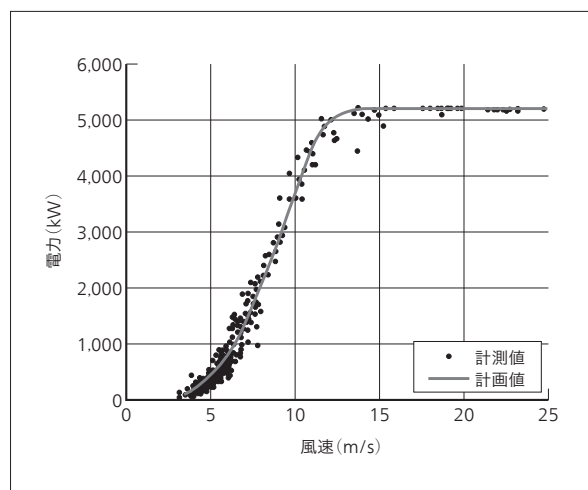
開発状況

これまで、ブレードに対する負荷試験や落雷試験、ドライブトレインに対するBack to Back試験や模型試験などの要素検証を行い、また、工場試験にて制御や振動特性の検証を行った^{5), 7)}。その後、陸上実証機においてHTW5.2-127に対する約1年の実証試験を実施し、発電性能や耐久性などを確認した^{8), 9)}。

2016年9月には実証機のブレードをより長いものに載せ替えることでHTW5.2-136に対する実証機とし、同時に増速機を国内メーカー品に変更した。試運転を経て2016年11月から商用運転に移行し、現在各種データを蓄積している。HTW5.2-136の実証機は発電性能で当初の予定をほぼ満足することが確認され (図1参照)、開発は最終段階まで来ている。

図1 | HTW5.2-136パワーカーブ

風況マストの風車ハブ高さ風速と電力との相関を描いたものを示す。



3. HTW5.2-127の実証機状況

3.1

FRT試験

風力発電が普及し、総電力量に対する割合が高まったことで、系統の電圧を維持するため、風力発電においても短い系統事故時には発電を継続すること (FRT: Fault Ride Through) が求められることとなった¹⁰⁾。そこで、HTW5.2-127においてそれに対応した制御を導入し、実証機で検証した。電気的な評価については既報^{9), 11)}のとおりであり、ここでは制御上の工夫や機械的な評価について報告する。

主にブレードによって構成される低速軸側のロータと発電機のロータを比較すると、慣性モーメントは増速機の増速比を考慮しても低速軸側のほうが大きく、系統事故などにより発電機トルクが急激に低下すると、ドライブトレイン全体の回転速度が上がると同時にドライブトレインの固有振動が発生する。系統電圧が復帰して発電機トルクを再び増加させる場合、タイミングが悪いとこの振動を助長するため大きなトルクが発生し、機器が破損するおそれがある。そこで、次の2つの対策を施した。

- (1) 系統事故時に発電機トルクをできるだけ残すことで衝撃力を緩和する。
- (2) 自動でタイミングよくトルクを上昇させる制御方法を開発し、振動を抑制する。

系統事故時の系統電圧の残存率は事故時間の関数として与えられており¹⁰⁾、それを基に試験条件を定めた (表2参照)。機械的には試験No.8 (短絡時間0.15 s、電

表2|FRT (Fault Ride Through)試験条件

系統連系規程を基に設定した。

No.	発電電力	短絡条件	短絡時間	残電圧率
1	(1) 20% (低風速時) (2) 100% (高風速時)	三相	1.4 s	84%
2		二相		
3		三相	0.9 s	49%
4		二相		
5		三相	0.45 s	22%
6		二相		
7		三相	0.15 s	0%
8		二相		

図2|FRT時の発電機トルク

計測値を定格値で正規化した値を示す。系統事故は0~0.15 sで発生した。

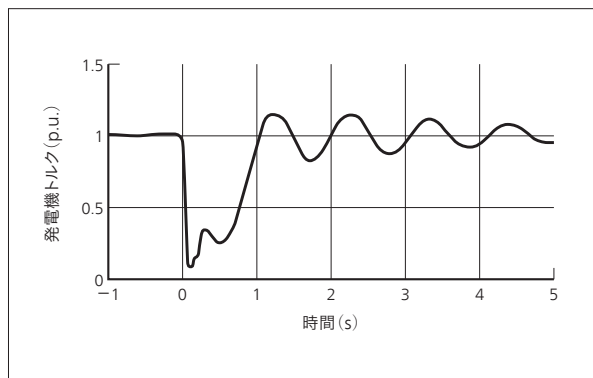
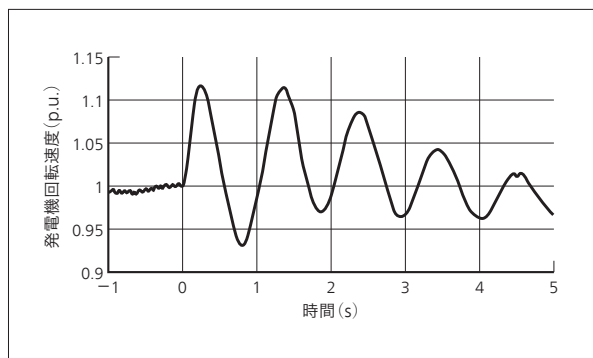


図3|FRT時の発電機回転速度

計測値を定格値で正規化した値を示す。



圧率0%, 2相短絡)において最も厳しい結果となった(図2~図5参照)。系統電圧復帰(時刻0.15 s)後, すぐには発電機トルクを上げずに時刻0.5~1.0 s間でトルクを増加させることで振動を抑制し, 低速軸や高速軸のトルクも許容値内に抑えることに成功した。

3.2

暴風待機

風車強度の設計検証のためには, 設計時に想定したさまざまな条件下における荷重の妥当性を実測によって確認する必要がある。疲労に影響が大きい発電時の荷重については過去に報告した^{8), 9)}。本稿では, 静強度でクリ

図4|FRT時の高速軸トルク

発電機のトルクと回転速度から過渡現象を考慮して算出し, 定格値で正規化した値を示す。

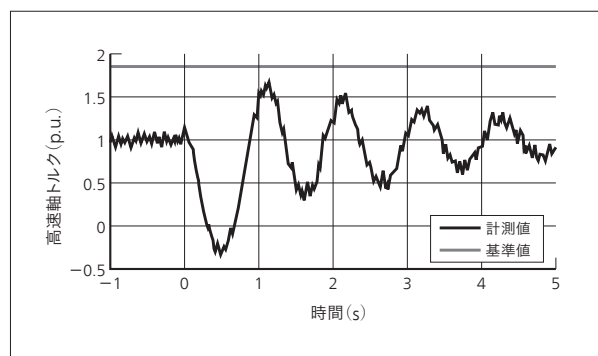
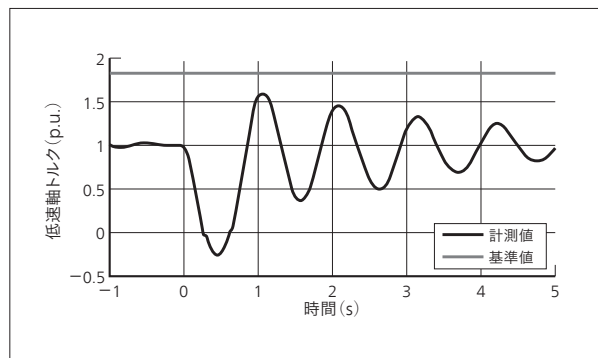


図5|FRT時の低速軸トルク

低速軸で計測したひずみより算出し, 定格値で正規化した値を示す。



ティカルになることが多い暴風待機時の荷重について報告する。

設計で想定している暴風待機時のヨー制御(風向に対してロータ面を追従させる制御)は次の3通りであり, 本稿では(3)の実測結果を報告する。

- (1) 系統通電時にヨーアクチュエータによって制御する(アクティブヨー制御)。
- (2) 停電時にダウンウィンド形態により受動的に制御する(パッシブヨー制御)。
- (3) 風車が異常停止している場合に制御しない。

2016年8月22日に実証機サイトに台風9号が接近した。風車近傍に設置された風況マスト(高さ90 m)において,

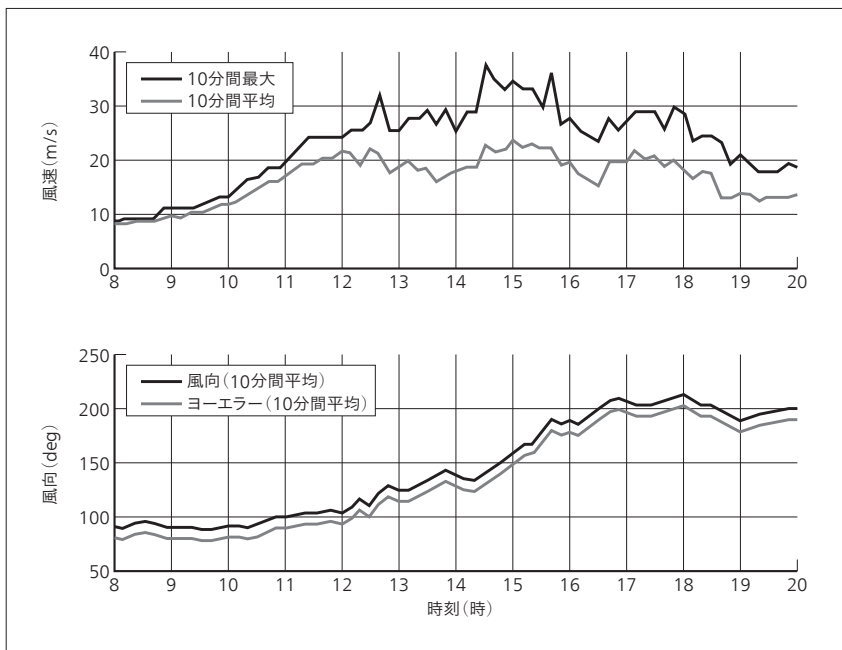


図6 台風襲来時の風速および風向・ヨーエラー時歴

風車の西南西約300 mに設置された高さ90 mの風況マストにおける10分間の統計値を示す。ヨーエラーは、風向からナセル方位角を引いたものである。

瞬間最大風速37.7 m/sが観測され、風向は約6時間で100 degから200 degに変化した(図6参照)。このとき風車は異常停止中であり、ヨー制御していなかったことから、12時頃まではほぼ横風(ヨーエラー90 deg)、16時以降は通常と反対側からの風(ヨーエラー180 deg)となった(同図参照)。

ブレードルート部の曲げモーメント(図7参照)は、8~9時は風速が低くロータが遊転しなかったためほぼ一定値であったが、遊転し始めると変動し、風速が高い15時頃には設計値の0.277倍となる最大値を観測した。

タワー基部の曲げモーメント(図8参照)は、風車の

前後方向よりも横方向において大きく、横方向の曲げモーメントは12時までの横風では風速が高くなるにつれて平均値が大きくなり、その後は風速が高くなって変動が大きくなることで、15時頃に設計値の0.207倍となる最大値を観測した。

今後、設計風速においても極値荷重が問題とならないかさらなる検討を行う。また、アクティブヨー制御やパッシブヨー制御における暴風待機時のデータを取得し、評価を行う予定である。

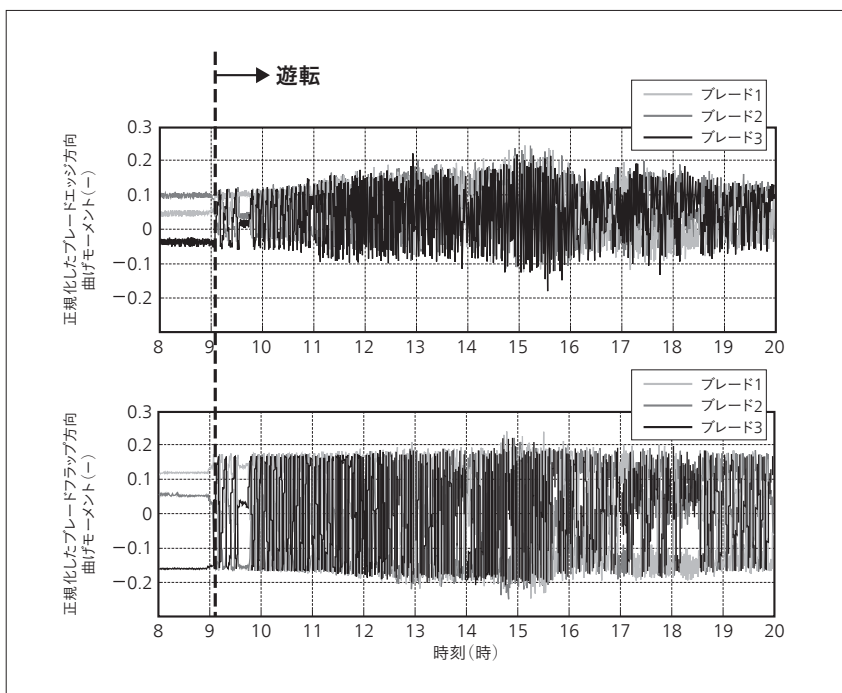


図7 台風襲来時のブレードルート部曲げモーメント時歴

計測されたひずみより算出したエッジ方向(上図)およびフラップ方向(下図)の曲げモーメントを設計極値荷重で正規化した値を示す。サンプリングは50 Hzである。

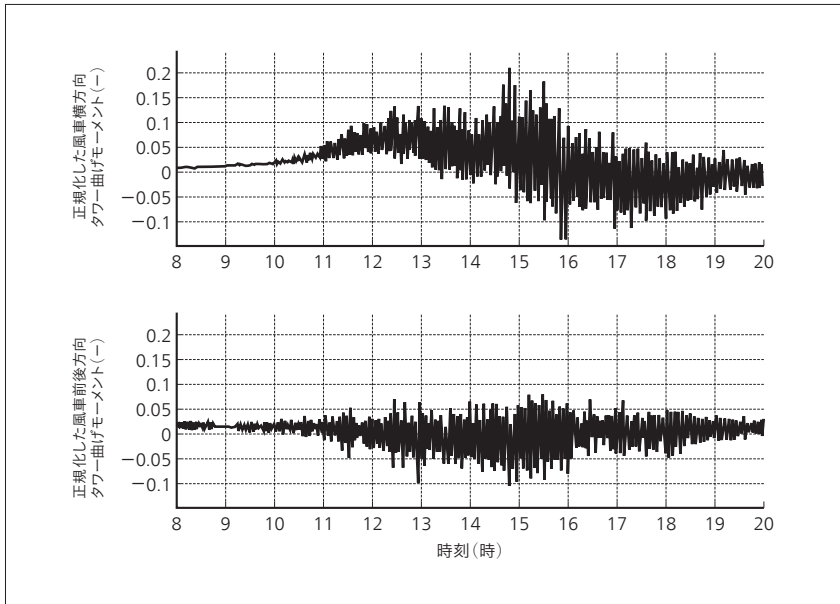


図8|台風襲来時のタワー基部曲げモーメント時歴

タワー基部で計測されたひずみおよびナセル方位角より算出した風車横方向（上図）および風車前後方向（下図）の曲げモーメントを設計極値荷重で正規化した値を示す。サンプリングは50 Hzである。

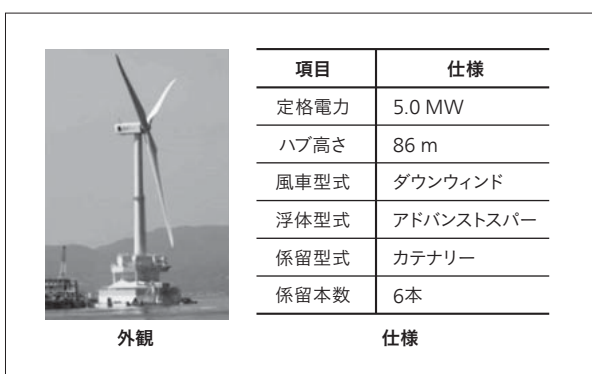
4. 福島5 MW浮体式風車の開発状況

本章では、上述の5 MW風力発電システムを洋上に浮かべた浮体構造物上に設置する浮体式洋上風力発電システムの開発状況について述べる（図9参照）。このシステムは、経済産業省委託事業「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」において建造されたものである¹²⁾。

浮体構造物は、円柱構造物の上下に六角形の平板状の構造物（アッパーハル、ローハル）を配置したアドバンストスパーである。アドバンストスパーの特徴は、アッパーハルとローハルを設置することで浮体構造物の波浪中動揺を抑えられるため、いわゆるスパー型に比べて浮体構造物の高さの増加を抑えられることから、スパー型における洋上での起立作業などの難工事を避けられる

図9|5 MW浮体式洋上風力発電システム「ふくしま浜風」の概要

経済産業省委託事業「福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」において建設されたものである。



ことである。2016年7月に福島沖へ浮体を設置し、9月に連系ケーブルの接続を完了し受電した。2017年3月まで試運転を実施し、4月以降は発電運転の実証をする計画である。

浮体式洋上風力発電システムは、浮体構造物が洋上に浮かべられているため、その姿勢（傾き）が変化しやすい。特に、発電運転時にロータ回転速度を定格値に保持するようにブレードピッチ角度を調整することで、システムの前後方向の傾きの振動が加振される現象（ネガティブダンピング現象）が発生する。

日立は、2015年度まで継続した環境省実証事業「浮体式洋上風力発電実証事業」にて、2 MW浮体式風力発電システムにおいて、ネガティブダンピング現象を低減する制御手法 [浮体振動制御 (FVC: Floating Platform Vibration Control)] を開発した^{13)~15)}。浮体振動制御は、ナセルに設置した傾斜角度センサーによりシステムの前後方向の傾きを検出し、ブレードピッチ角度を操作してロータが受けるスラスト力を調整することで、システムの前後方向の傾き振動を低減する。浮体振動制御を福島5 MW浮体式風車に適用し、5 MW風力発電システムおよびアドバンストスパーの浮体構造物への適用可能性の確認と性能向上を実施する計画である。実機での試運転や発電運転実証に先立ち、シミュレーション検証を実施し、福島5 MW浮体式風車においてもネガティブダンピング現象を低減できることを確認している（図10参照）。

また、本システムはブレードピッチ角度を独立に調整する機能を備えている。この機能を利用し、ロータ面内で変化する風況に合わせて、ロータ1回転中にブレードピッチ角度を独立に調整することで、ロータ回転軸に発

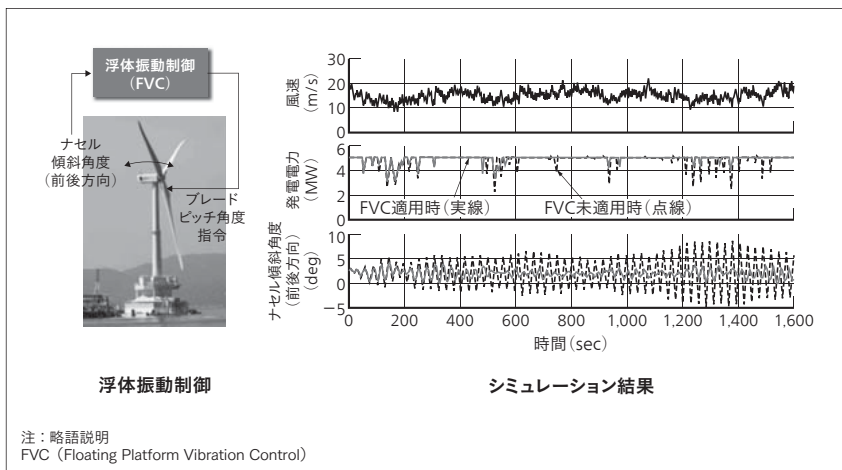


図10 5 MW浮体式洋上風力発電システムのシミュレーション結果

ナセルに設置した傾斜角度センサーによってシステムの前後方向の振動を検出し、ブレードピッチ角度を操作することで風から受けるスラスト力を調整する浮体振動制御 (FVC) により、ナセル傾斜角度 (システムの前後方向の角度) の振動を低減し、安定した発電運転が可能である。

生ずる曲げ荷重の低減やシステム効率の向上が可能な制御手法についても開発を進める計画である。

5. おわりに

本稿では、日立の5 MW風車の開発状況や、実証機での実証試験および浮体式風車の開発状況を風車制御に焦点を当てて述べた。

今後、5 MW風車開発を完遂し、浮体式の実証を行うことで、今後も世界的に拡大が見込まれる洋上風力市場に信頼性の高い製品を供給していきたい。

謝辞

5 MW風力発電機の開発においては、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization) よりご支援を頂いた。感謝申し上げます。

福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業においてはコンソーシアム各位よりご協力いただいております。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献など

- 1) International Energy Agency : Medium-Term Renewable Energy Market Report 2016 (2016)
- 2) 経済産業省：長期エネルギー需給見通し (2015.7)
- 3) 山崎：風力発電導入拡大への取組と課題，第38回風力エネルギー利用シンポジウム (2016)
- 4) 佐伯，外：5 MW洋上風車および2 MW浮体式洋上風車の技術開発，日立評論，96，5，341～346 (2014.5)
- 5) 飛永，外：5MW洋上風車HTW5.0-126の開発状況，第37回風力エネルギー利用シンポジウム (2014)
- 6) International Electrotechnical Commission, Wind turbine generator systems - Part1: Design requirements, IEC 61400-1 edition 4 CDV (2016.12)

- 7) 飛永，外：日立製作所5MW機の技術開発，実証，今後の展開，日本風力エネルギー学会誌，Vol. 39，No. 1，p. 93～96 (2015)
- 8) 清木，外：5 MWダウンウィンド風車および洋上風力用浮体式変電設備の開発，日立評論，97，12，742～746 (2015.12)
- 9) 小畑，外：5MWダウンウィンド風車の実証試験，エネルギーと動力 (2016)
- 10) 日本電気技術規格委員会，系統連系規程JEAC9701-2012 (2012)
- 11) Ito, et al.: A verification of the FRT (Fault Ride Through) capability for 5MW wind turbine system, WWEC (2016)
- 12) 福島洋上風力コンソーシアム，<http://www.fukushima-forward.jp/>
- 13) 戸田建設株式会社：浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書 平成25年度 (2014.6)
- 14) 戸田建設株式会社：浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書 平成26年度 (2015.3)
- 15) 戸田建設株式会社：浮体式洋上風力発電実証事業委託業務成果報告書 平成27年度 (2016.3)

執筆者紹介



清木 荘一郎
日立製作所 電力ビジネスユニット 電力生産統括本部
自然エネルギー発電システム生産本部 風力発電システム部
所属
現在，風力発電システムの開発業務に従事
日本風力エネルギー学会会員



坂本 潔
日立製作所 電力ビジネスユニット 電力生産統括本部
自然エネルギー発電システム生産本部 風力発電システム部
所属
現在，風力発電システムの開発業務に従事
博士 (工学)
電気学会会員



角谷 啓
日立製作所 研究開発グループ エネルギーイノベーションセンター
電力システム研究部 所属
現在，風力発電システムの制御技術開発に従事
日本機械学会会員，電気学会会員



佐伯 満
日立製作所 電力ビジネスユニット 電力生産統括本部
自然エネルギー発電システム生産本部 所属
現在，風力発電システムの開発プロジェクトに従事
技術士 (電気電子部門)
電気学会会員